

Les contraintes aux systèmes de cultures coton-céréales dues à l'acidité

J. GIGOU

Icrisat-Cirad, BP 320, Bamako

Résumé — Les sols acides se forment sous l'action du drainage qui entraîne les bases échangeables. La tendance à l'acidification des sols est accentuée par les cultures. Dans la région Mali-Sud, le climat n'est pas très pluvieux et les zones où l'ensemble des sols posent des problèmes d'acidité pour les cultures sont peu nombreuses. Cependant, dans certaines situations, l'acidité empêche la culture du cotonnier, la plante la plus sensible à l'acidité et la seule qui reçoit régulièrement des engrais. L'intensification de la culture n'est envisageable, dans ce cas et dans les conditions socio-économiques actuelles, que si l'apport de 5 à 10 t/ha de fumier au maximum permet de faire pousser correctement le cotonnier. Dans le cas contraire, les sols doivent être réservés aux cultures moins sensibles à l'acidité, ou bien être conduits en culture itinérante pour que les cendres de la jachère corrigent l'acidité de l'horizon de surface. Dans d'autres cas où l'acidité est moins forte, le cotonnier pousse correctement s'il est semé précocement, très médiocrement s'il est semé plus tardivement. Les rendements sont augmentés si les pailles de sorgho, en culture précédente, sont brûlées. Ailleurs, on observe une réponse favorable à l'apport d'un peu de calcium sous forme de sulfate. Ces cas où le coton pousse relativement bien sont certainement plus favorables que les sols très acides pour des actions visant à améliorer l'équilibre en calcium des sols.

Abstract — Constraints to cropping systems resulting from soil acidity in cotton-cereals rotations. Soil acidification results from leaching of exchangeable cations following heavy rains. The problem is exacerbated by cultivation. The rainfall in Mali-Sud (the southeastern part of Mali), is moderate, and areas where all soils are too acid for cultivation are restricted in size. Nevertheless, soil acidity problems do occur in specific sites to the point that cotton, the most acid-sensitive crop in the rotation, cannot be cultivated. As this crop is the only one that receives fertilizers, intensification of cotton production cannot be envisaged under current socio-economic conditions, unless farm manure applications, at dosages of 5-10 t/ha, are possible. Otherwise, these soils should be used either for less acid-sensitive crops, or for shifting cultivation, so that ashes from the burned fallow can reduce soil acidity in the upper soil horizon. In situations where soil acidity is less of a problem, cotton thrives when sown early, whereas its growth is adversely affected with late sowing. However, yields can be increased by

burning the residues from the previous sorghum crop. In other cases, a positive yield response has been observed following calcium sulfate application. The areas where cotton grows relatively well are certainly better suited for actions aiming at improving the calcium balance in the soil, than areas where acidity is too high.

Le Mali a un climat peu pluvieux, qui ne favorise pas, à priori, l'acidification des sols, si bien que l'on hésite parfois à y reconnaître les problèmes liés à l'acidité des sols. Pourtant, même s'ils ne prennent pas des aspects aussi spectaculaires que dans les grandes régions de sols acides, il existe des problèmes d'équilibre entre cations et certains sols sont trop acides pour le cotonnier, la plante la plus sensible des rotations habituelles.

Les mécanismes de l'acidification

Le drainage, moteur de l'acidification

L'eau qui draine après avoir traversé tout le sol entraîne des éléments solubles, en particulier Ca, Mg, Na et K. Il en résulte un appauvrissement en bases échangeables qui se traduit par une baisse du pH du sol. La tendance naturelle à l'acidification existe dans tous les sols qui subissent régulièrement du drainage. Elle est forte dans les zones humides, mais elle existe aussi dans de nombreuses zones à climat contrasté avec des pluies totales annuelles modestes, mais plusieurs mois de saison des pluies pendant lesquels le drainage est abondant. Le drainage est plus important dans les sols sableux ou gravillonnaires qui ont une capacité de rétention de l'eau faible.

Sous culture, le drainage est souvent accentué car la durée de la végétation et le recouvrement du sol par la plante cultivée sont inférieurs à ceux de la végétation naturelle.

Les remontées biologiques, frein à l'acidification

Il existe un phénomène inverse qui limite les pertes : les remontées biologiques par les plantes. En effet, les teneurs en éléments minéraux dans l'eau qui draine sont réduites quand le système racinaire est bien développé, car les racines absorbent une grande partie des éléments en solution, notamment les nitrates, le calcium et le magnésium. Les éléments mobilisés par les plantes sont remontés vers les parties aériennes ou les racines, localisés principalement dans les horizons superficiels, et leur recyclage permet d'enrichir les horizons de surface. Il peut donc s'établir un équilibre sous végétation naturelle.

Sous culture, les remontées sont souvent réduites. L'importance des remontées dépend de la vitesse d'installation de la végétation au début de la saison des pluies et de la profondeur d'enracinement, donc de la date de semis, des espèces et des variétés cultivées, de la fertilité du sol et de la fumure. Les systèmes de culture qui conservent une végétation active en permanence favorisent les remontées : culture-relais de plantes annuelles, plantes pérennes, plantes de couverture, etc. Les arbres conservés dans les champs, karités, *Faidherbia albida*, etc., peuvent remonter les éléments jusqu'à une grande profondeur.

Les remontées sont fortes sous la jachère, si bien qu'il s'établit un équilibre dans le système de culture itinérante, même dans les régions très humides (Nye et Greenland, 1960). Quand la culture alterne avec la jachère, les remontées biologiques dominent sous jachère et les bases accumulées en surface dans la végétation sont libérées par le feu, ce qui permet d'augmenter le pH des horizons supérieurs du sol.

Les cations échangeables

Ca, Mg et K sont les principales bases échangeables dans les sols acides. Na n'est qu'en quantité négligeable car il est peu retenu par le complexe absorbant, si bien que l'eau qui draine l'entraîne rapidement hors du profil. Ca est généralement le plus abondant, suivi de Mg. Ce sont donc ces deux cations qui sont aussi les plus abondants dans la solution du sol et dans l'eau de drainage. Le potassium est moins abondant. Il est bien retenu par la kaolinite, moins bien par la matière organique.

Quand le sol est acide, les bases échangeables n'occupent qu'une partie du complexe absorbant. Le complément n'est pas occupé par des ions H^+ , mais par Al^{+++} ou Mn^{++} . En effet, l'argile n'est plus stable quand elle contient beaucoup de H^+ , si bien qu'un peu de Al des réseaux cristallins passe en position échangeable. Les ions aluminium peuvent prendre de nombreuses formes, $Al(OH)^{++}$, $Al(OH)_2^+$, polymérisé, etc. et il s'établit des équilibres complexes entre toutes ces formes. Quand le pH est suffisamment acide ($< 5,0$), les ions aluminium deviennent un peu plus solubles et peuvent empêcher la croissance des plantes, car les formes monomériques de Al en solution sont très toxiques (Edwards et Bell, 1989).

L'entraînement par les anions accompagnateurs

Les principaux anions, dans la solution du sol et dans l'eau qui draine, sont habituellement les carbonates (CO_3^{--}) et les bicarbonates (HCO_3^-) qui résultent de la dissolution de CO_2 ; les nitrates et les sulfates qui proviennent de la minéralisation de la matière organique ou des engrais ; éventuellement des chlorures provenant des engrais.

La présence d'anions dans la solution augmente la quantité de cations échangeables qui passent en solution. Il est bien clair que la solution du sol et l'eau de drainage ne sont jamais des acides dilués, car il se dissout approximativement autant de cations qu'il y a d'anions. Aussi, les teneurs en Ca et Mg dans l'eau qui draine sont fortement corrélées aux teneurs en nitrate et en sulfate (Piéri, 1987 ; 1989).

Les anions solubles apparaissent ainsi comme des facteurs d'entraînement des bases échangeables. Par contre, les ions phosphate, insolubles et bien retenus par le sol, n'ont pas cet effet. De même, dans de nombreux sols acides, les ions sulfates sont retenus dans les horizons de profondeur (Ahn, 1993) et alors ils cessent de jouer ce rôle d'entraînement. Les nitrates ne sont que faiblement retenus, sauf peut-être dans certains « oxisols », suivant la classification américaine (Melgar et al., 1992). Les chlorures, apportés surtout par les engrais potassiques, sont, eux aussi, solubles et lixiviés par l'eau qui draine. Ils entraînent principalement Ca et Mg, les deux cations les plus abondants, alors que le potassium est relativement bien retenu par le sol.

La mesure de l'acidité des sols

Le pH du sol est une mesure conventionnelle du pH de l'eau ou d'une solution saline en équilibre avec du sol mis en suspension dans un rapport sol / liquide déterminé.

Le pH - eau, est obtenu avec une suspension dans l'eau distillée. Il mesure l'acidité actuelle du sol, mais il a l'inconvénient d'être souvent variable d'une mesure à l'autre. C'est pourquoi certains préfèrent utiliser des solutions salines, par exemple le CaCl_2 N/100, qui donnent des mesures plus stables. Laudelout (1992) fait remarquer que la signification écologique du pH - eau est assez claire mais sa mesure peu précise, alors qu'au contraire, avec les solutions salines diluées, on obtient une mesure plus précise dont la signification écologique est plus floue.

Le pH - KCl, obtenu dans une solution normale de KCl, donne une valeur du pH beaucoup plus acide, car il déplace tous les ions échangeables, en particulier H^+ et Al^{+++} . Il mesure ainsi l'acidité potentielle du sol (Duchaufour, 1970).

L'acidité est déterminée avec plus de précision par la saturation en Al échangeable, c'est-à-dire la part de la Cec qui est occupée par Al échangeable. En général, on admet qu'il y a peu de problèmes tant qu'Al échangeable occupe moins de 30 % de la Cec et qu'au contraire, seules les cultures les plus tolérantes poussent quand la saturation en Al dépasse 60 % (Ahn, 1993 ; Von Uexkull et Bosshart, 1989b).

Effets des techniques de culture

Sous culture, l'acidification, due à la perte des bases échangeables, se produit par trois mécanismes : la lixiviation par l'eau qui draine accentuée par rapport au milieu naturel, les prélèvements de bases échangeables par les récoltes et l'action des engrais minéraux. L'apport de fumier ou d'amendements calciques permet d'éviter l'acidification.

La lixiviation par l'eau de drainage

Elle dépend, d'une part, de l'importance du drainage et, d'autre part, des teneurs en bases dans l'eau du drainage. Ces deux facteurs sont généralement augmentés sous culture.

Le drainage est augmenté quand la période de croissance active de la culture est plus courte que celle de la végétation naturelle, ou quand la couverture du sol par la culture est réduite. Les techniques qui permettent la meilleure utilisation de l'eau pluviale favorisent une meilleure croissance et une production plus élevée, mais elle tendent aussi à limiter le drainage et les pertes par lixiviation. On peut citer les semis précoces, l'utilisation de variétés de cycle long bien adaptées au climat local, par exemple des variétés photosensibles, ou bien des cultures-relais dans les variétés de cycle court (maïs-mil, mil-niébé, etc.), les arbres du parc à karité ou à *F. albida* qui utilisent en saison sèche l'eau stockée dans le sol à des profon-

deurs non accessibles aux racines des cultures annuelles (Monnier, 1990).

L'installation rapide d'un système racinaire profond et puissant, ainsi que la présence d'arbres, sont favorables car ils remontent ces éléments en surface et limitent donc les quantités d'éléments minéraux qui drainent. Par exemple, la lixiviation des nitrates est généralement plus faible sous céréales que sous arachide ou coton (Piéri, 1989).

Finalement, toutes les techniques culturales qui permettent une bonne croissance des plantes et une bonne couverture du sol pendant toute la saison des pluies sont favorables. Les terres bien cultivées, où la croissance des plantes est bonne, présentent donc des risques moindres d'acidification que des terres équivalentes mal cultivées. Une mention spéciale doit être faite pour la technique traditionnelle du parc arboré, à *F. albida* ou à karité, qui participe efficacement au maintien de la fertilité.

Prélèvements par les récoltes

Les prélèvements sont variables suivant les cultures, les rendements obtenus et la richesse du sol (si le sol est riche, les teneurs des plantes en éléments minéraux sont plus fortes). En général les récoltes exportent de 30 à 100 kg de CaO/ha/an et de 20 à 60 kg de MgO/ha/an . Une grande partie de ces éléments est contenue dans les tiges et les résidus de récolte et peut être restituée au sol (Monnier, 1990) soit :

- brûlés, à condition que les cendres ne soient pas entraînées par le vent ;
- en paillage sur le sol ;
- par l'enfouissement des pailles ;
- après utilisation par les animaux, par l'apport du fumier.

Dans la région Mali-Sud, le droit de vaine pâture en saison sèche est général. Aussi les pailles sont largement recyclées par le pâturage par les animaux ainsi que par la consommation par les termites des tiges tombées à terre. Sur les céréales, il reste souvent quelques-unes des grosses tiges non dégradées au moment des labours, qui sont rassemblées en tas et brûlées. Sur les cotonniers, il reste les tiges lignifiées qui sont coupées ou arrachées puis brûlées en tas. Dans tous ces cas, une grande partie des bases est recyclée.

Dans d'autres cas, les pailles de céréales ou surtout les tiges des cotonniers sont brûlées en gros tas et les cendres sont utilisées pour préparer la « potasse », un produit traditionnel riche en hydroxyde de potassium, qui sert pour certaines préparations culinaires et pour la fabrication artisanale du savon. On valorise ainsi les minéraux contenus dans les tiges, mais on les exporte du champ et même souvent du terroir.

Enfin certains paysans ramassent des tiges pour l'alimentation des animaux à l'étable en saison sèche et

pour la litière (Landais *et al.*, 1991). Les éléments minéraux sont exportés de la parcelle, mais ils seront recyclés par le fumier, éventuellement sur un autre champ que le paysan souhaite enrichir.

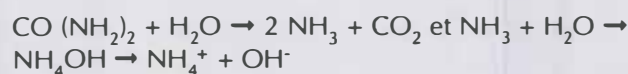
Action des engrais minéraux sur le pH du sol

Les engrais ont une action forte sur la croissance des plantes, ce qui tend à augmenter l'utilisation de l'eau pluviale, diminuer le drainage, modifier parfois l'enracinement et augmenter tous les prélèvements minéraux par la culture.

Mais ils ont en plus une action propre sur le sol : ils peuvent être acidifiants, neutres ou alcalinisants. Cet effet n'est pas dû au pH de la solution de l'engrais dans l'eau, mais à la réaction globale de l'engrais avec le sol. Par exemple, le superphosphate se dissout dans l'eau en donnant une solution très acide, mais il n'a aucun effet acidifiant sur le sol, car les réactions de fixation des ions phosphate sur le sol neutralisent cette acidité. Au contraire, l'ammoniac anhydre, NH_3 , forme une solution basique dans l'eau, mais dans le sol, la nitrification de NH_3 en NO_3^- se produit en quelques semaines et l'effet est alors fortement acidifiant (Tisdale *et al.*, 1985).

Les formes d'engrais les plus courantes sont acidifiantes, sauf le phosphate naturel qui, grâce à son apport important de Ca^{++} , est neutralisant (Gros, 1979). Les engrais actuellement vulgarisés sont donc eux aussi acidifiants.

C'est surtout l'azote ammoniacal qui, par sa nitrification, explique le pouvoir acidifiant des engrais. Le pH du sol varie dans les semaines ou dans les mois qui suivent l'apport d'engrais et l'on peut passer par des phases d'augmentation puis de diminution du pH. Par exemple, l'urée (Recous, 1987 ; Tisdale *et al.*, 1985), l'engrais azoté le plus utilisé dans la région, subit d'abord une hydrolyse qui libère, en quelques jours, l'ammoniaque, suivant une réaction qui peut se résumer à :



Cette réaction augmente le pH, ce qui peut être très favorable en sol acide : amélioration de la nitrification, diminution de la fixation du phosphore du sol ou du phosphore de l'engrais apporté en mélange avec l'urée. Elle peut aussi entraîner des pertes par volatilisation de NH_3 quand le sol est très sableux (pouvoir tampon faible) et la pluie faible, car l'augmentation du pH en surface, de 1 à 2 unités, est suffisante pour que le pH devienne basique autour des grains d'urée, même en sol acide (Soubies *et al.*, 1955 ; Bouwmeester *et al.*, 1985). On conseille de bien enfouir l'urée pour éviter ce risque.

La nitrification correspond à la réaction :

$\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$. Elle est acidifiante, puisqu'elle fait apparaître 2H^+ , ce qui fait cesser l'augmentation temporaire du pH due à NH_3 et acidifie le sol par rapport à la situation de départ. Parmi les nitrates formés, une partie est absorbée par les plantes et transformée en azote organique, une partie peut être dénitrifiée et une autre partie draine en entraînant des ions Ca^{++} et Mg^{++} . Seule, cette dernière partie entraîne une acidification permanente du sol.

Ainsi l'urée augmente le pH pendant son hydrolyse, puis le diminue pendant sa nitrification suivant des réactions qui peuvent être schématisées en :

$\text{CO}(\text{NH}_2)_2 \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\text{NO}_3^- + 2\text{H}^+$ et une partie de cette acidification devient permanente par le drainage de NO_3^- .

Le sulfate d'ammoniaque est plus acidifiant que l'urée. Il n'y a pas d'effet neutralisant initial et l'on peut schématiser les réactions globales en :

urée : $\text{NH}_3 + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$

sulfate d'ammoniaque : $\text{NH}_4^+ + 2\text{O}_2 \rightarrow \text{NO}_3^- + 2\text{H}^+ + \text{H}_2\text{O}$

Une partie importante de l'acidité due au sulfate d'ammoniaque peut devenir permanente par suite du drainage des nitrates et des sulfates. Par contre, les sulfates absorbés par la culture n'entraînent pas d'acidification permanente.

Les apports d'engrais azoté en excès par rapport aux besoins des cultures ont un effet défavorable. En effet, le sol stocke l'azote dans la matière organique, dont le C/N est peu variable et qui ne peut donc retenir que très peu d'azote supplémentaire. L'excédent, qu'il provienne directement de l'engrais, ou bien du sol après mélange avec l'azote apporté, est perdu. Dans les sols acides, ce peut être par dénitrification, ce qui est un moindre mal, ou le plus souvent par drainage, ce qui entraîne des pertes de bases.

Effet du fumier

Le fumier a un effet très favorable en sol acide : il augmente le pH et surtout il fixe rapidement l'aluminium.

Le fumier recycle les bases contenues dans les pailles consommées par les animaux ou piétinées dans le parc. Il transfère aussi vers les champs cultivés des éléments provenant du pâturage par les animaux dans les parcours. Souvent, les paysans ajoutent au fumier les cendres, ce qui permet de recycler sur les champs les bases provenant des bois de feu. Dans la région Mali-Sud, une partie des « fumiers » est en fait formée principalement des ordures ménagères, très riches en cendres. Ce sont alors de véritables amendements basiques.

Mais la matière organique, fumier ou matière organique fraîche, a aussi un autre effet très important en sol acide : la complexation très rapide de l'aluminium libre de la solution du sol (Bell et Bessho, 1993 ; Kretzschmar *et al.*, 1991 ; Berek *et al.*, 1995).

Dans les zones de savane, l'apport régulier de fumier permet d'éviter l'acidification et la culture devient durable (Piéri, 1989). C'est ainsi que, dans la région Mali-Sud, les paysans investissent du temps pour la fabrication et l'utilisation du fumier, afin de maintenir la fertilité de leurs terres. Budelman et van der Pol (1992) font remarquer qu'en Europe, au moment de la transition vers la culture continue, les paysans utilisaient des techniques comparables et que, dans les Flandres vers 1700, ils ont réinvesti ainsi jusqu'à 50 % de leur produit brut.



Les sols acides et leur culture

Les sols acides

Il existe des sols acides aussi bien dans les régions tempérées que dans les régions tropicales. Cependant, les régions tropicales humides sont connues pour leurs grandes zones de sols acides, qui couvrent la majeure partie de ces régions (Sanchez et Logan, 1992). En effet, d'une part, le climat chaud et humide permet une altération complète des minéraux primaires jusqu'à une grande profondeur et la lixiviation des bases libérées et, d'autre part, ces régions n'ont pas été touchées par les glaciations qui ont rajeuni tous les sols des pays tempérés (Eswaran *et al.*, 1992). La culture de ces sols acides est étudiée car ils constituent des réserves de terre non ou peu cultivée dans des régions en forte expansion démographique.

Typiquement, ces sols tropicaux acides sont situés dans des régions très humides. Ils sont très profonds, souvent argileux dès la surface en Amérique, alors qu'en Afrique ils ont souvent un horizon plus sableux en surface (Ahn, 1993). Ils peuvent facilement être utilisés pour les plantes pérennes (palmier, hévéa, ananas, etc.), alors qu'au contraire, avec les cultures annuelles, il est difficile de maintenir la fertilité.

Sous savane, l'horizon de surface est moins acide, grâce aux cendres qu'il reçoit régulièrement (Nye et Greenland, 1960). En profondeur, le sol peut être hérité de périodes où le climat était plus humide qu'actuellement. Aussi, on peut trouver des sols profonds et acides même dans des régions comme le Mali-Sud où la pluviométrie actuelle n'est pas très forte. C'est ainsi que, dans un puits creusé en 1995, à Nogolasso, près d'un de nos sites d'essais, la base du profil de sol, nettement marquée par un horizon marmorisé, se trouvait à 6 m de profondeur.

Sous cultures, les sols de savane ont tendance à s'acidifier et les rendements baissent fortement. On peut corriger ce problème par des apports d'amendement calcique ou de fumier (Pichot *et al.*, 1981 ; Piéri, 1989).

Inconvénients des sols acides

Les sols acides ont de nombreux inconvénients.

Toxicité aluminique

Les plantes sont très sensibles à Al en solution : elles poussent mal et leurs racines sont atrophiées. Les ions H^+ ne sont pas toxiques par eux-mêmes, si bien que des plantes peuvent pousser sur certains sols très acides mais qui ne contiennent que peu d'ions aluminium en solution. Parfois d'autres ions comme Mn^{++} deviennent trop solubles et toxiques en sol acide. Il existe de grandes différences de tolérance suivant les espèces et les variétés (Sanchez et Salinas, 1981).

Des sols pauvres en bases

Les sols acides ont, par nature, des teneurs faibles en bases, K, Ca et Mg et ces bases sont diluées dans beaucoup de Al échangeable. Aussi les carences en K et Mg sont fréquentes. La carence en calcium est rare, car beaucoup de plantes sont plus sensibles à la toxicité aluminique qu'à la carence en calcium. Cependant, certaines plantes tolérantes à la toxicité aluminique peuvent répondre favorablement à une amélioration de leur alimentation en Ca, par exemple la canne à sucre (Edwards et Bell, 1989) ou le manioc (Schmidt *et al.*, 1990).

Des charges variables et faible Cec

Les sols acides ont souvent des charges variables avec le pH, portées par la matière organique et par la kaolinite. Aussi quand le sol devient plus acide, la Cec devient plus faible. Cela peut rendre difficile la fertilisation en K et Mg, quand ces cations sont mal retenus. Cela rend aussi plus difficile la correction de l'acidité par chaulage, car le besoin en Ca augmente dès que le pH augmente (Von Uexkull et Bosshart, 1989a).

Modifications biologiques et nitrification

Quand le sol est très acide, la faune et la microflore du sol sont modifiées et l'activité biologique est généralement réduite. En particulier, la nitrification peut être réduite car *Nitrobacter* est inhibé à pH acide. Cependant, même en sol très acide, on observe généralement de la nitrification, soit parce qu'il existe des souches bactériennes nitrifiantes adaptées au sol (Buresh, 1987), soit parce qu'il existe des microsites à pH plus élevé (Dommergues, 1970).

Fixation du phosphore

A pH acide, il existe de nombreuses charges positives dans le sol, localisées sur les cassures des silicates et sur les oxydes de fer et d'aluminium, sur lesquelles le phosphate est fixé solidement (Uribe, 1989). Ce phosphore difficilement assimilable peut être mobilisé lentement par les plantes et accumulé par la jachère dans la biomasse et dans l'horizon supérieur du sol (Nye et Greenland, 1960). Les plantes à croissance lente et à cycle long peuvent mobiliser des quantités importantes de phosphore, tout en ayant des besoins instantanés modestes, satisfaits par des sols pauvres en P assimilable. Certaines plantes ont une grande capacité à prélever le phosphore du sol et sont donc peu sensibles à la carence, par exemple le manioc, grâce à son association avec des mycorhizes (Steiner, 1982). Cependant quand le sol est sableux en surface, comme c'est le cas le plus souvent en zone de savane d'Afrique de l'Ouest, la capacité de fixation du phosphore reste modeste, si bien que des doses modérées de phosphore sont suffisantes pour corriger les carences (Poulain, 1976 ; Piéri, 1989).

Finalement dans les sols acides, certaines cultures adaptées sont possibles (niébé, mil, manioc, etc.), alors que d'autres plus sensibles sont presque impossibles (soja, cotonnier, etc.).

Cultiver les sols acides

Quand le sol est trop acide, certaines cultures ne poussent que de façon très irrégulière. En effet, le pH varie fortement au cours de l'année et certainement aussi d'une année à l'autre, en fonction des pluies, de la minéralisation de la matière organique, etc. Quand le pH est juste à la limite de ce que les plantes peuvent supporter, elles poussent correctement ou ne poussent pas du tout suivant les cas (année, date de semis, etc.). Les apports d'engrais peuvent avoir des effets négatifs, car les cations apportés déplacent de l'aluminium échangeable des argiles vers la solution du sol, comme KCl le fait dans la mesure du pH - KCl (Edward et Bell, 1989).

Il est certainement préférable d'éviter que le pH ne baisse au-delà de la limite pour laquelle la plante la plus sensible de la rotation est affectée. En effet, le redressement du pH d'un sol très acidifié n'est pas toujours facile :

- les apports d'amendements massifs et coûteux posent des problèmes de rentabilité et de financement difficilement solubles dans les conditions socio-économiques des petits paysans d'Afrique de l'Ouest ;
- le premier effet d'un apport d'amendement calcaïque n'est généralement pas favorable ; une interprétation simple de ce phénomène peut être donnée : le déplacement par Ca^{++} de Al^{+++} , qui passe en solution ;

Al est ensuite éliminé par précipitation si le pH de la solution du sol a été suffisamment relevé par l'amendement ; pour de faibles doses, l'élimination de Al peut être incomplète et le pH final plus acide (Fallavier et Babre, 1990). Pour les doses plus fortes, l'augmentation de Al en solution n'est que transitoire, mais peut gêner la première culture ;

- pour les sols à charges variables, l'apport d'amendement est inefficace s'il sert à augmenter la Cec et non à corriger l'acidité (Von Uexkull et Bosshart, 1989a) ;
- les apports massifs d'amendements peuvent avoir des inconvénients : carences induites en oligo-éléments, déséquilibre entre cations K-Ca-Mg, etc.

Par contre, le fumier a un effet très favorable en sol acide : il augmente le pH, améliore la Cec et surtout il fixe rapidement l'aluminium en solution.

En culture peu intensive, il est souvent plus indiqué de choisir des espèces et des variétés qui tolèrent l'acidité (Sanchez et Benites, 1988), plutôt que de vouloir à grands frais la corriger. En effet, beaucoup des cultures des régions tropicales sont bien adaptées à l'acidité (niébé, manioc, mil, riz, etc.). La sélection des variétés pour leur tolérance à l'acidité est possible.

Si l'on doit corriger l'acidité, on se limite au minimum permettant la culture de la plante la plus sensible de la rotation. En général un pH compris entre 5 et 5,5 est suffisant. Par exemple, Sément (1983) trouve que le cotonnier pousse correctement à Bouaké quand le pH est supérieur à 5,2. Dans les conditions actuelles du Mali, cette correction est faite par le fumier, les cendres et la jachère.

Exemples de problèmes d'acidité dans la région Mali-Sud

Sensibilité à l'acidité des sols du système de culture

La région Mali-Sud est une grande région de production du coton. Toutes les rotations principales sont à base de cotonnier et de céréales. Ce sont les revenus du coton qui financent les engrais et le matériel de culture attelée et permettent une certaine intensification de l'agriculture. Le cotonnier est souvent la seule culture fertilisée dans la rotation. Aussi, quand la culture du cotonnier n'est pas possible, le sol ne reçoit pas d'engrais et il s'appauvrit rapidement. On est alors obligé de le remettre en jachère, une pratique devenue peu fréquente sur les sols favorables au cotonnier.

Ainsi, quand la culture du cotonnier n'est plus possible, ou même dès que ses rendements diminuent, le système coton - céréales subit de fortes contraintes qui peuvent aboutir à sa disparition. Le plus souvent, le paysan abandonne les champs qui présentent des problèmes et va défricher d'autres parcelles. Mais quand la pression foncière est trop forte et ne permet pas de nouveaux défrichements, il doit abandonner ses cultures pour aller s'installer dans une autre région ou éventuellement partir vers la ville.

Le climat de la région, favorable aux cultures annuelles, comporte une saison des pluies et une longue saison sèche. Avec environ 1 000 mm de pluviométrie annuelle, il n'est pas très pluvieux au total. Ces conditions ne favorisent pas l'acidification et la région ne comporte effectivement pas de grandes zones où tous les sols posent des problèmes d'acidité pour les cultures. Cependant, il existe des situations où l'acidité empêche la culture du cotonnier, avec les contraintes que cela induit pour le système de culture. Il existe aussi d'autres cas où le cotonnier pousse raisonnablement bien mais montre cependant des signes liés à l'acidité du sol ou aux déséquilibres entre cations. Il est par exemple fréquent que les semis très précoces poussent bien, alors que des semis légèrement plus tardifs ont une croissance médiocre. Cela pose évidemment des problèmes de calendrier cultural. Il existe enfin des cas où l'apport d'un peu de calcium ou le brûlis des tiges de l'année précédente permettent une augmentation des rendements.

Nous allons illustrer ces situations par trois exemples observés dans les expérimentations que nous avons conduites en milieu paysan et sur la station de Samanko depuis 1993.

Konobougou ou les limites du coton

Pour la réalisation de tests d'amélioration de la fertilité sur des terres épuisées par la culture, un exemple nous a été proposé aux environs immédiats de Konobougou, un gros village situé le long de la route goudronnée entre Fana et Ségou. Avec environ 800 mm de pluviométrie annuelle, cette région est à la limite nord de la zone cotonnière. Il existe une auréole à pression foncière assez forte autour du village et il n'y a plus de bonnes terres disponibles à moins de 15 km.

Le champ retenu, appartenant à M. Broulaye Diarra, est cultivé depuis environ 80 ans. Il est probable que la culture a d'abord alterné avec des jachères de longue durée. Cependant, depuis dix à vingt ans, les jachères sont peu nombreuses et de courte durée. Les teneurs en matière organique sont très faibles. Sur ce champ, les cotonniers ne poussent que très médiocrement, ne répondent pas bien à l'engrais minéral (tableau I) et donnent des rendements d'environ

Tableau I. Production avec engrais Npk sur des sites acides des villages de Konobougou et Siguidolo (unité = kg/ha).

Village site	Konobougou champ	Siguidolo		
	Broulaye	Flae9N	Flae8N	Flae9A
Coton	300 à 500	100 à 200	< 100	< 100
Sorgho	environ 1000	(< 100)	(< 100)	(< 100)
Mil	1 000 à 2 500	700	400	400

(...) = arrière-effet de l'engrais.

500 kg/ha. Par contre, le sorgho ou le mil poussent bien et répondent normalement aux engrais.

Le fumier permet d'améliorer considérablement la croissance des cotonniers. Les villageois estiment que le fumier est efficace sur cotonnier, mais pas sur sorgho et mil. Cette affirmation, à priori étonnante, s'explique par le fait que le « fumier » habituellement utilisé est en réalité des ordures ménagères riches en cendres. C'est donc plutôt un amendement basique qui améliore beaucoup la croissance du cotonnier, sensible à l'acidité, et peu celles du mil et du sorgho, moins sensibles.

Les mesures de pH permettent de confirmer que l'acidité limite la croissance des cotonniers. Nous avons fait, sur toutes les parcelles d'un essai, des mesures régulières de pH - eau et pH - KCl de l'horizon 0-20 cm, à partir des semis en juin 1994 et jusqu'à la fin 1995, à raison de deux fois par mois en juin, juillet et août, puis une fois par mois jusqu'à la fin décembre et une ou deux fois pendant la saison sèche. En 1994, on observe une relation nette entre la croissance des cotonniers et le pH - KCl moyen pendant la période de croissance des cotonniers (figure 1). Les relations sont beaucoup moins nettes avec pH - eau (non représenté). Dans le détail, le total tiges + coton-graine est mieux corrélé avec le pH - KCl au moment du semis, alors que la production de coton-graine est mieux corrélée avec les pH mesurés en septembre et octobre. Deux traitements se distinguent nettement par une production inférieure à celle attendue d'après leur pH : le traitement T00 sans engrais et un traitement qui a reçu une t/ha de calcaire broyé peu avant le semis. Sur ce dernier, le pH augmente rapidement en fin de saison des pluies (figure 2), mais trop tard pour que le cotonnier en profite pleinement.

On observe une variation du pH au cours de l'année (figure 2), avec une baisse du pH en début de saison régulièrement pluvieuse et au contraire des pH plus élevés en saison sèche. Au début de la saison des pluies 1995, on observe des valeurs plus élevées après une période sèche succédant à quelques pluies précoces. La variation du pH dépend des engrais apportés. Ainsi par rapport à T00, le témoin sans

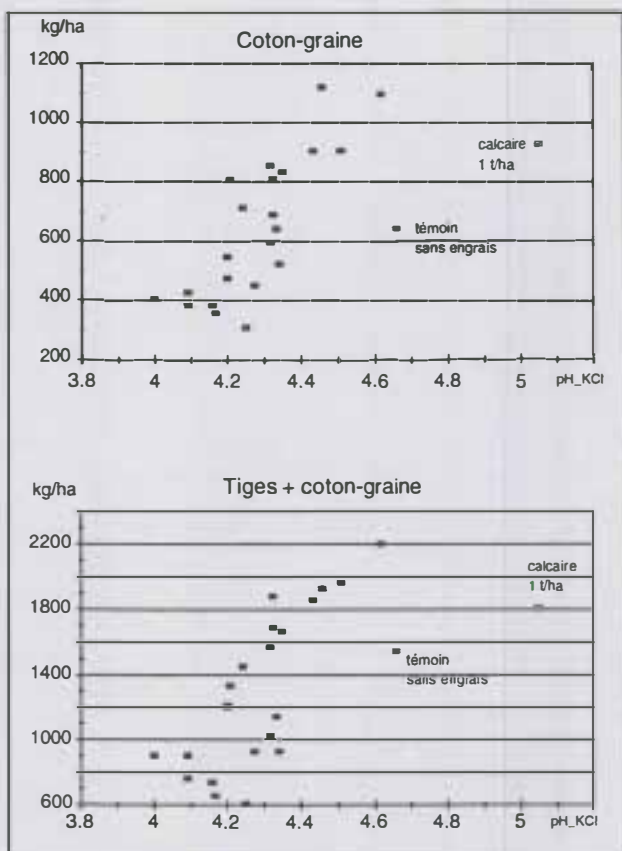


Figure 1. Relation entre le pH-KCl de l'horizon 0-20 cm du sol et la production des cotonniers sur l'essai d'apport de calcium, à Konobougou, en 1994. Le pH-KCl porté en abscisse est la moyenne des six mesures réalisées entre le 23/6 et le 3/10/94.

engrais, le pH diminue nettement avec la fumure Npks alors que la diminution est moins nette avec Np. Les rendements (tableau II) sont aussi plus élevés avec Np, bien que la différence soit insuffisante pour apparaître statistiquement significative. L'apport de 1 t/ha de calcaire broyé empêche la diminution du pH en début de saison des pluies, mais c'est seulement à partir de fin août que l'augmentation du pH par rapport au témoin devient nette. Dès l'année suivante, le pH revient à des valeurs proches de celles du témoin.

Ce champ de Konobougou est donc trop acide pour le cotonnier, mais sa récupération est possible en utilisant du fumier ou des ordures ménagères.

Sur le village voisin de Siguidolo, une zone apparaît encore plus acide : le cotonnier ne pousse pas et, en plus, le sorgho et même le mil ne poussent que médiocrement (tableau I). Sur le site 3, les cotonniers montrent des symptômes semblables aux symptômes visibles sur des sols ferrallitiques acides en Côte d'Ivoire, par exemple, sur les parcelles en culture permanente sans amendements calciques des essais de longue durée de la station Idessa-Cv de Bouaké. Les cotonniers lèvent mais ne se développent pas. Un certain nombre de jeunes pieds meurent. Ceux qui

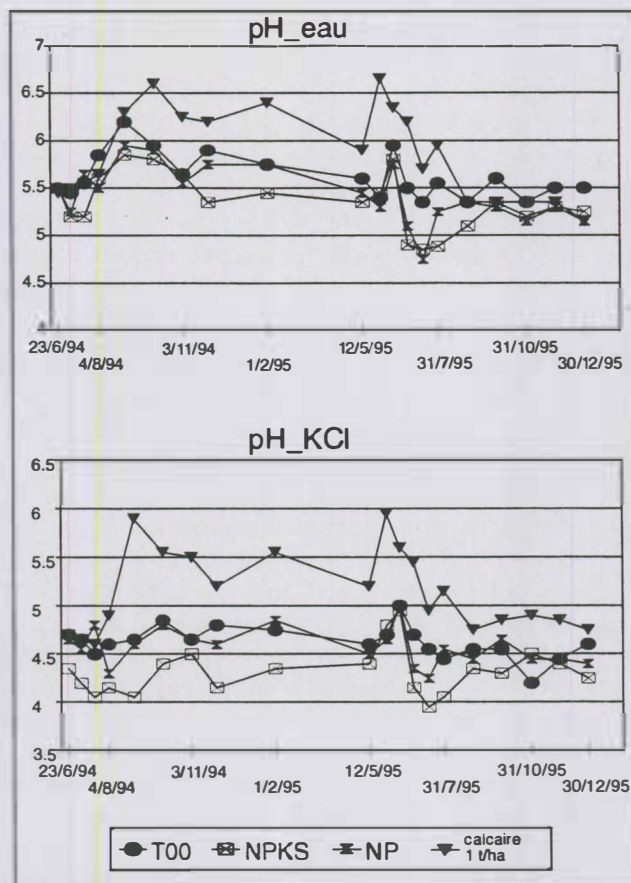


Figure 2. Evolution du pH du sol au cours des années 1994 et 1995, à Konobougou (champ de Broulaye Diarra, horizon 0-20 cm).

survivent émettent deux ou trois petites feuilles et ne poussent plus. Ils restent ainsi, comme momifiés, pendant toute la saison des pluies. En fin de saison, au mois de septembre, ils recommencent à pousser, forment une ou deux petites fleurs, puis ils se dessèchent quand la saison sèche s'installe. Nous interprétons ce comportement comme le résultat de pH bas pendant la saison des pluies et de leur remontée en fin de saison. Les analyses de sol (tableau III) montrent qu'il y a un peu d'aluminium échangeable sur ce site.

Les essais réalisés dans cette zone montrent une certaine réponse du sorgho au fumier et au calcaire broyé (tableau IV). Par contre, aucun des traitements essayés, même le fumier à 10 t/ha, n'a été suffisant pour permettre une croissance substantielle des cotonniers. Des doses d'amendements plus fortes ne seraient guère réalistes dans les conditions socio-économiques actuelles, car les paysans préféreraient, logiquement, aller défricher des bonnes terres à une quinzaine de kilomètres plutôt que de dépenser beaucoup d'argent pour récupérer des terres peu fertiles. Les karités ne poussent pas dans cette zone, si bien que le parc arboré est pauvre (*Cassia sieberiana*, etc.) et que les arbres participent moins que dans

Tableau II. Rendements en coton-graine et pH du sol (moyenne des six mesures réalisées entre le 23/6 et le 3/10/94), à Konobougou, suivant les apports de Np et Npks.

	T00	Npks	Np
Coton-graine (kg/ha)	643	476	1 095
pH eau	5.8	5.5	5.6
pH KCl	4.7	4.2	4.6

Tableau IV. Effet du calcaire et du fumier sur sorgho (moyenne de 9 variétés) et sur cotonnier sur sol acide à Siguidolo (unité = kg/ha).

		Npk	Npk + calcaire (1t/ha)	Npk + fumier (5 t/ha)
Sorgho	grains	586	860	730
1995	tiges + grains	2 810	3 725	3 246
Coton	coton-graine	249	134	300
1996	tiges + graines	577	285	705

Tableau III. Analyse de terre sur des sites acides des villages de Konobougou et Siguidolo.

	Broulaye Konobougou	Flae9N	Siguidolo Flae8N	Flae9A
Granulométrie (en %)				
Argiles		10,9	13,0	10,1
Limons fins		4,0	3,4	4,4
Limons grossiers		10,0	10,3	9,9
Sables fins		34,4	34,9	38,6
Sables grossiers		40,7	38,4	37,1
Matière organique (en %)				
Matière organique	0,28	0,55	0,50	0,60
Carbone organique	0,16	0,32	0,29	0,35
Azote total	0,21	0,37	0,33	0,36
C/N	7,6	8,7	8,8	9,7
Phosphore (exprimé en P)				
Phosphore total ppm	59			
Phosphore Olsen ppm	8,5	18,3	9,6	6,6
Phosphore Bray n° 2 ppm	7,2			
Complexe absorbant (cobalti-hexamine)				
Ca échangeable cé/kg	1,09	0,66	0,77	0,71
Mg échangeable cé/kg	0,22	0,31	0,39	0,23
K échangeable cé/kg	0,07	0,16	0,13	0,07
Na échangeable cé/kg	0,05	0,03	0,02	0,06
Mn échangeable cé/kg	0,03	0,04	0,05	0,04
Al échangeable cé/kg	0,00	0,04	0,04	0,06
H échangeable cé/kg	0,00	0,01	0,01	0,01
Cec cé/kg	1,33	1,23	1,57	1,18
pH				
pH-eau		5,40	5,30	5,55
pH-KCl		4,30	4,20	4,40
Echantillons frais, dosage Samanko				
pH-eau		4,9	4,9	5,1

d'autres zones du même terroir au maintien de la fertilité. Il faut donc s'attendre à ce que cette zone reste dans l'état où elle est actuellement : des cultures à base de mil qui alternent avec des périodes de jachère d'une dizaine d'années dont les cendres améliorent le pH.

Si l'on observe les positions dans la toposéquence, ces deux zones acides de Konobougou et Siguidolo sont dans des situations comparables, dans la partie

haute du glacié cultivé, juste à l'aval des zones cuirassées. C'est une zone sensible au ruissellement et à l'érosion sélective des éléments fins (Gigou, communication « Les aménagements en courbes de niveau à l'échelle du champ »). Cependant, quand le sol est acide, l'aménagement contre l'érosion ne suffit pas pour permettre la culture continue. Il faut aussi lutter contre l'acidité, ce qui n'est possible, dans les conditions économiques actuelles, que par

l'utilisation du fumier. Deux cas différents se présentent alors suivant la difficulté pour corriger l'acidité :

- si l'apport de fumier à une dose raisonnable, 5 à 10 t/ha au maximum, permet de cultiver du cotonnier, la terre peut être utilisée en culture continue suivant une rotation coton – céréale. Sa fertilité tendra à s'améliorer grâce aux apports d'engrais et de fumier ; cette terre pourra alors être traitée de la même façon que les terres fertiles situées à l'aval sur le glacis cultivé ;
- sinon, la terre ne peut être utilisée que pour des cultures tolérantes à l'acidité, telles que le mil. Dans les conditions socio-économiques actuelles, elle ne peut être conduite qu'en culture itinérante, sans fertilisation ou avec très peu de fertilisation et sa fertilité restera faible ; on observe ainsi un liseré de sols pauvres en culture itinérante autour des zones plus fertiles en culture permanente.

Samanko ou l'intérêt du brûlage des pailles

La station Icrisat de Samanko, près de Bamako, reçoit environ 1 000 mm de pluie chaque année, mais le sol est acide (tableau V) et souvent les cotonniers

poussent mal. Ainsi, sur les essais du sous-programme agronomie de 1989 à 1993, les rendements étaient habituellement inférieurs à 1 t/ha, sauf après l'apport de fumier.

En 1993, nous avons installé un nouvel essai dans le but d'étudier l'évolution du sol sous culture. Pour cela, nous avons défriché une nouvelle parcelle en jachère depuis de nombreuses années. Le défrichement a été fait sans brûlis. Les analyses du sol prélevé au moment du défrichement sont reportées dans le tableau VI. On vérifie bien que le sol est acide dès la surface, mais il n'y a que très peu de Al échangeable. L'horizon 20-40 cm est plus acide, comme le montre le pH - KCl et la présence d'un peu plus de Al échangeable. Cependant, l'écart entre pH eau et pH - KCl est plus grand et, finalement, pH - eau apparaît plus élevé. Cette observation illustre bien le fait que pH - eau est une mesure assez fluctuante. Il est probable que le pH varie au cours de l'année comme à Konobougou, et qu'il est donc plus élevé en saison sèche et plus faible au début de la saison des pluies, mais nous n'avons pas fait de dosages systématiques pour le vérifier.

Tableau V. Le pH du sol sur la station de Samanko (profondeur = 0-20 cm).

Année	Parcelles	Laboratoire d'analyse	pH-eau	pH-KCl
1991	toutes	Icrisat-Niamey	4,53 à 5,87	
1993	P9b et P9c	Cirad-Montpellier	4,55 à 5,70	4,15 à 5,35
1996	parcelles cultivées	Icrisat-Samanko	4,58 à 5,43	4,03 à 5,15

Tableau VI. Analyses moyennes du sol de l'essai « Evolution du sol » à la station de Samanko. Echantillons prélevés après défrichement et avant la première culture, en octobre 1993. Profondeur = 0-20 cm. Valeur moyenne des 70 parcelles élémentaires.

Profondeur	cm	Série B		Série C	
		0-20	20-40	0-20	20-40
Matière organique					
Carbone organique	%	0,50	0,41	0,44	0,39
Azote total	%	0,51	0,47	0,48	0,46
phosphore (exprimé en P)					
Phosphore total	ppm	137	126	133	124
Phosphore Olsen	ppm	11,6	5,4	8,5	6,7
Phosphore Bray n° 2	ppm	7,0	2,7	7,2	4,0
Complexe adsorbant (cobalti-hexamine)					
Ca échangeable	cé/kg	1,19	1,57	1,17	1,53
Mg échangeable	cé/kg	0,53	0,69	0,48	0,57
K échangeable	cé/kg	0,18	0,09	0,17	0,07
Na échangeable	cé/kg	0,06	0,05	0,06	0,03
Mn échangeable	cé/kg	0,06	0,07	0,04	0,05
Al échangeable	cé/kg	0,01	0,11	0,01	0,09
H échangeable	cé/kg	0,03	0,05	0,03	0,05
pH Cobalti-hexamine		4,81	4,70	4,80	4,63
Cec	cé/kg	2,08	2,66	1,97	2,35
pH					
pH eau		4,97	5,48	4,91	5,50
pH KCl		4,54	4,26	4,59	4,24

Tableau VII. Rendements en coton-graine sur l'essai « Evolution du sol » à la station de Samanko, en 1995 et 1996.

Paille	exportée	mulch double	mulch simple	enfouie	brûlée	moyenne
	labour	non labour		labour		
Année 1995 (série C)						
T00	1,99	1,71	1,34	1,73	1,44	1,64
Npk	2,61	2,12	1,63	2,99	3,13	2,50
Npk (avec Pnt)	2,74	2,22	1,02	2,66	3,15	2,36
Fumier 5 t/ha	2,49	1,45	1,48	2,35	2,86	2,12
Fumier 10 t/ha	3,09	2,00	2,22	3,01	2,66	2,59
Fumier 5 t/ha + Npk	2,41	2,27	1,35	2,82	3,65	2,50
Fumier 10 t/ha + Npk	2,73	3,20	1,71	3,19	3,24	2,81
moyenne	2,58	2,14	1,53	2,68	2,87	2,36
Année 1996 (série B)						
T00	1,29	1,23	1,55	1,28	2,48	1,57
Npk	1,93	1,97	2,38	2,15	2,67	2,22
Npk (avec PNT)	2,04	1,87	2,34	1,94	2,09	2,06
Fumier 5 t/ha	1,98	2,21	1,94	2,04	2,78	2,19
Fumier 10 t/ha	2,66	2,07	2,89	2,12	3,06	2,56
Fumier 5 t/ha + Npk	2,24	2,85	2,33	2,40	3,19	2,60
Fumier 10 t/ha + Npk	2,50	2,86	2,72	2,87	3,46	2,88
Moyenne	2,09	2,15	2,31	2,11	2,82	2,30

Mulch simple = pailles laissées sur place

Mulch double = paille produite + paille de la parcelle avec exportation et même fertilisation

Npk avec Pnt = tout le phosphore est apporté par le Pnt

Cet essai est cultivé suivant une rotation triennale coton / maïs / sorgho associé au niébé. Trois séries différentes contiennent chaque année les trois cultures. Les traitements et sous-traitements permettent de comparer différents modes de restitution des pailles et différentes fertilisations. La première année, 1994, était particulière car il n'y avait évidemment pas de restitution des pailles de la récolte précédente. Nous disposons des résultats de 1995 et 1996.

Le cotonnier, semé précocement, a très bien poussé et a donné des rendements élevés (tableau VII). En 1995, il existe une différence importante entre les traitements avec et sans labour, qui est due au fait que les pluies au moment du semis étaient faibles si bien que les traitements sans labour ont mal levé et que de nombreux ressemis ont dû être faits. En 1996, la levée a été identique sur les parcelles avec ou sans labour et il n'y a eu alors que peu d'écart de rendements entre ces deux techniques.

Deux observations montrent l'influence de l'acidité du sol :

– les ressemis poussent mal ; une observation faite le 25/7/97, montre un cotonnier bien développé provenant du premier semis le 31/5/97 et un cotonnier provenant du deuxième semis le 17/6/97 qui reste rabougri ; ce dernier s'est développé, modestement, plus tard dans la saison des pluies ; ce fait est interprété comme la conséquence de la baisse du pH au début de la saison des pluies ; le pH en fin de saison

sèche, non mesuré, devait être compris entre 5,0 et 5,5 alors qu'au moment de la photographie, il était d'environ 4,6 ;

– les rendements sont plus élevés sur les traitements où la paille de sorgho a été brûlée (tableau VII) ; il y avait une petite différence en 1995, en 1996 la différence est énorme, plus de 500 kg/ha de coton-graine.

Il se confirme donc bien que le pH acide de la station est à la limite de ce que le cotonnier, la plante la plus sensible de la rotation, peut supporter. En semant précocement, avec fumier, engrais Npk et brûlis des tiges de l'année précédente, les rendements dépassent 3 t/ha de coton-graine chacune de ces deux années, ce qui est un rendement très élevé correspondant au potentiel dû à une pluviométrie favorable et un sol profond. Mais il suffit d'un semis retardé pour que le développement des cotonniers soit fortement ralenti. Le brûlis des tiges est généralement déconseillé, mais il s'est révélé très favorable dans ces conditions particulières.

Nogolasso ou le problème du calcium

Ce village est situé entre Sikasso et Koutiala, dans une région où la pluviométrie annuelle est d'environ 900 à 1 000 mm. Ce village a adopté, au cours des années 80, la petite motorisation par des tracteurs

Tableau VIII. Le pH du sol sur les essais de Nogolasso en juin 1994 (traitement T00, horizon 0-20cm).

	Calcium 1	Calcium 2	Calcium 3	Calcium 4	Calcium 5
pH eau	5,3	5,4	6,1	5,6	5,8
pH-KCl	4,4	4,4	5,0	4,4	4,8

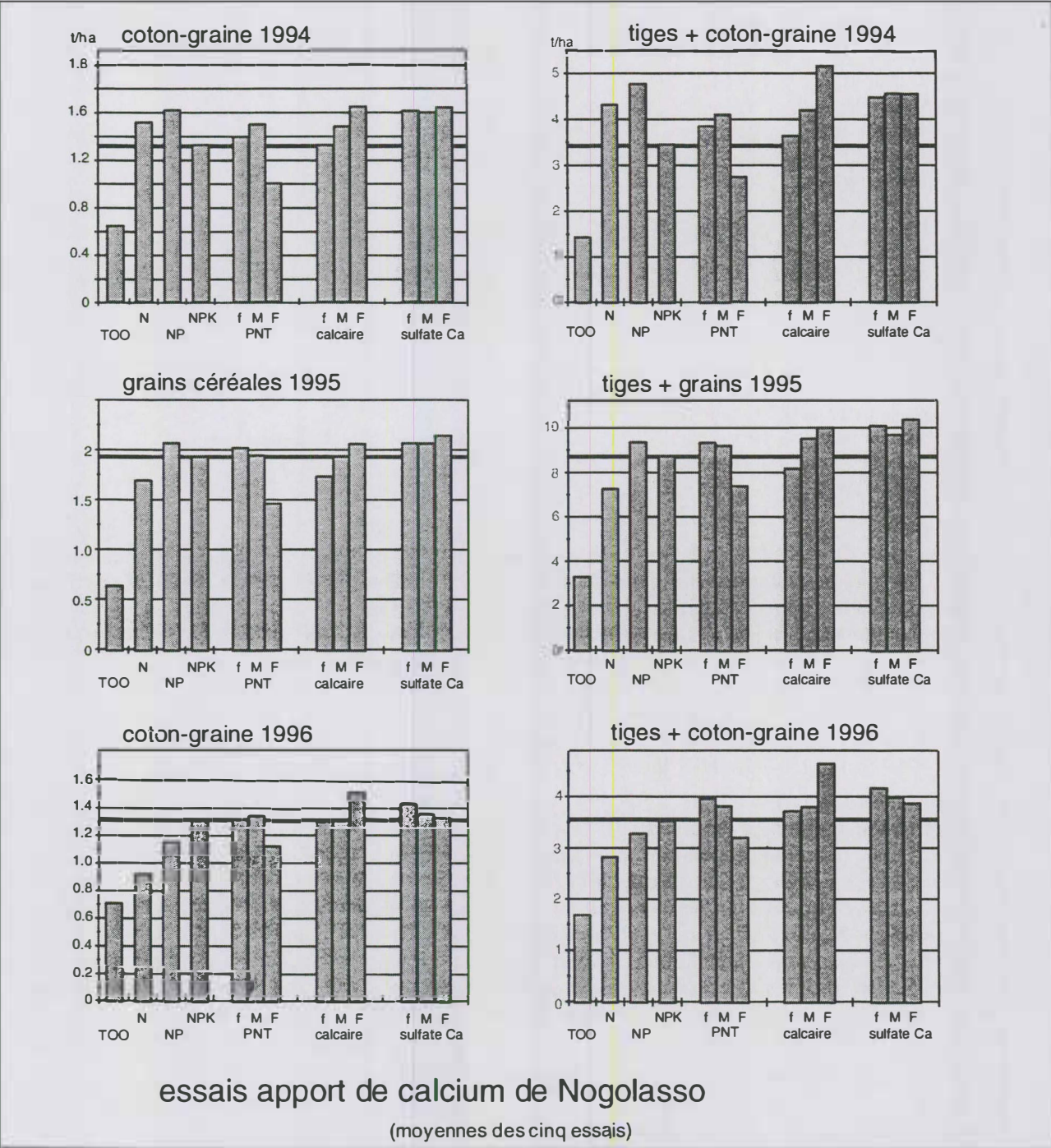


Figure 3. Effet d'un complément de calcium, sous forme de phosphate naturel du Tilemsi (Pnt), de calcaire broyé ou de sulfate de calcium (plâtre), à différentes doses sur la rotation coton-céréales (maïs et sorgho associés).
f = doses faibles = moyenne de 25, 50 et 75 kg/ha/an (avec Npk).
M = doses moyennes = moyenne de 100 et 200 kg/ha/an (avec Npk).
F = dose forte = 1000 kg/ha en 1994 et arrière-effet en 1995 et 1996 (avec Npk).
Les 4 témoins sont : T00 = sans engrais ; N = N seul (urée) ; Np = sans K (phosphate diammonique) et Npk (moyenne de Npk avec chlorure et Npks avec sulfate de potassium).

Bouyer, qui a entraîné une augmentation des surfaces cultivées et des défrichements importants. L'intensification (utilisation d'engrais et de fumier, etc.) est relativement forte. Les paysans se plaignent que les rendements des cotonniers sont passés en une quinzaine d'années d'environ deux t/ha, ce qui permettait de rembourser les investissements sans problèmes particuliers, à environ 1 200 à 1 400 kg/ha, ce qui rend plus difficile les remboursements.

Le pH du sol, proche de 5,5, n'est pas très acide (tableau VIII). Cependant, des essais d'apport de calcium ont été installés dont les résultats sont présentés dans la figure 3.

On constate d'abord que la première année, sur coton, les rendements sont plus faibles avec Npk qu'avec Np seul. C'est là une observation très fréquente, souvent rapportée dans les résultats d'essais de l'1^{er}, mais les différences sont faibles et restent au-dessous du seuil de signification statistique. La deuxième année, la différence entre Np et Npk s'estompe, puis la 3^e année, on commence à observer une réponse au potassium, comme cela est habituel dans des champs cultivés depuis longtemps (Crétenet *et al.*, 1994).

Si l'on ajoute à la fumure Npk du sulfate de calcium, les rendements sont un peu plus élevés qu'avec Npk seul ; 25 à 75 kg/ha de plâtre sont suffisants. Des doses plus fortes n'ont ni avantage, ni inconvénient. On peut noter que des fumures à base de superphosphate simple apporteraient des doses comparables de sulfate de calcium. Cependant, le super simple est un engrais peu concentré, qui subit des frais de transport élevés par unité fertilisante, si bien que son utilisation n'est guère envisageable dans un pays comme le Mali, loin des ports ou des usines de fabrication du superphosphate.

Le calcaire a un effet à la plus forte dose (1 t/ha), mais pas ou peu d'effet aux faibles doses. Nous attribuons cette différence à la plus faible solubilité du calcaire.

Enfin, le phosphate naturel n'a pratiquement pas d'effet dans les conditions de cet essai. Les doses d'engrais ont été choisies de telle façon que le P du phosphate naturel n'ait pas d'effet sur les rendements. En effet la dose de P soluble (du phosphate diammonique) est suffisante pour satisfaire les besoins de la culture. L'effet du calcium apporté par le Pnt, objet de cet essai, peut alors être déduit des comparaisons avec le calcaire et le sulfate de calcium. Il apparaît clairement que cet effet est faible. Pour une raison inconnue, la dose 1 000 kg de Pnt, apporté en 1994, a donné des rendements plus faibles.

Deux cents kg/ha d'augmentation du rendement, cela peut sembler modeste. C'est à la limite de signification des tests statistiques et c'est très inférieur à l'effet habituel de l'azote ou du phosphore. Mais, à priori, il pourrait être rentable d'apporter 50 kg de sulfate de

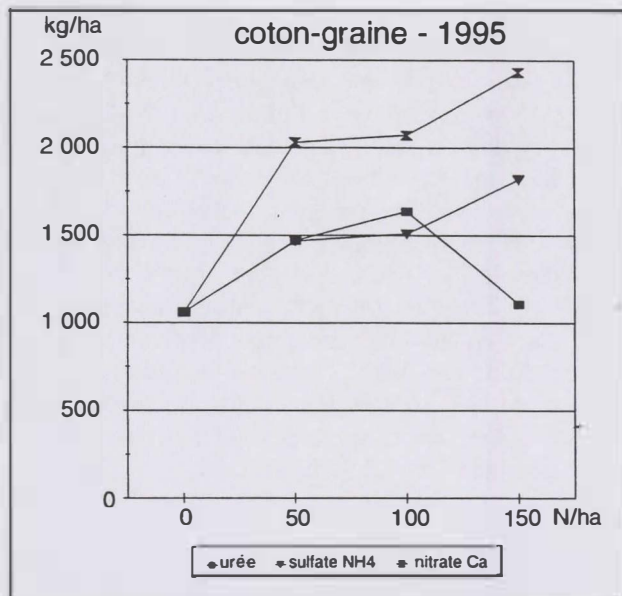


Figure 4. Comparaison entre nitrate de calcium, urée et sulfate d'ammoniaque, apportés au semis. Essai forme d'azote réalisé à Nogolasso (région de Sikasso).

calcium pour obtenir 200 kg de grains, surtout en utilisant du phospho-gypse, un sous-produit de la fabrication du super phosphate souvent gênant pour les usines. C'est pourquoi ces résultats préliminaires, qui suggèrent des effets de l'équilibre entre cations K et Ca, méritent d'être confirmés dans d'autres situations.

Le nitrate de calcium, qui apporte beaucoup de Ca, peut aussi avoir des effets très favorables sur cotonnier, nettement supérieurs à ceux de l'urée ou du sulfate d'ammonium qui n'apportent pas de Ca et sont au contraire acidifiants (figure 4). Malgré les grandes différences de rendement observées, il est peu probable que le nitrate de calcium puisse être utilisé sur cotonnier. En effet, il est peu concentré (15,5 %) et supporte donc des frais de transport élevés par unité d'azote. De plus, très hygroscopique, il pose des problèmes de stockage en période humide et d'épandage. Mais ce résultat confirme bien l'intérêt des apports de calcium dans certaines situations.

Conclusion

Dans la région Mali-Sud, certains sols sont trop acides pour le cotonnier, la plante la plus sensible de la rotation coton-céréales habituelle. Dans les conditions économiques actuelles, il n'est pas possible d'envisager des investissements importants pour corriger l'acidité, mais on peut y pratiquer une culture itinérante à base de plantes tolérantes à l'acidité, comme le mil ou le niébé, qui ne reçoivent pas ou presque pas d'engrais. Ces sols forment donc des zones de culture itinérante, en marge des zones de

culture continue coton - céréales plus intensive établies sur les sols plus fertiles.

Dans les zones un peu plus fertiles où le cotonnier pousse correctement, des problèmes se posent quand l'acidité est juste à la limite de ce qui est tolérable : les risques d'échecs des cultures sont plus élevés et les semis tardifs poussent mal. L'apport de fumier est alors une technique efficace et déjà largement utilisée par les paysans. L'apport d'une petite dose de calcium, sous forme de sulfate, a donné aussi une augmentation du rendement modeste mais qui pourrait être rentable. Ces cas où le coton pousse relativement bien sont certainement plus favorables que les sols très acides pour des actions visant à améliorer l'équilibre en calcium des sols.

Références citées

- AHN P.M., 1993. Tropical soils and fertilizer use. Longman, Harlow, Essex 264 p.
- BELL L.C., BESSHO T., 1993. Assessment of aluminium detoxification by organic materials in an Ultisol, using soil solution characterization and plant response. In MULONGOY K., MERCKX R. (Eds), 1993. Soil organic matter dynamics and sustainability of tropical agriculture. Proceeding International Symposium Leuven, Belgium, 1991/11/4-6. Wiley-Sayce, p. 317-330.
- BEREK A.K., RADJAGUKGUK B., MAAS A., 1995. The effect of different organic materials on the alleviation of Al toxicity in soybean on a red-yellow podzolic soil. In Date R.A., Grundon N.J., Rayment G.E., Probert M.E. (Eds) : Plant-soil interactions at low pH: principles and management. Proceeding Third International Symposium on Plant-Soil Interactions at Low pH, Brisbane, Queensland, Australia, 1993/9/12-16. Developments in Plant and Soil Sciences, 64 : 579-584.
- BOUWMEESTER R.J.B., VLECK P.L.G., STUMPE J.M., 1985. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. Sssa J. 49 (2) : 376-381.
- BUDELMAN A., VAN DER POL F. van der 1992. Farming systems research and the quest for sustainable agriculture. Agroforestry systems 10 : 187-206.
- BURESH R.J., 1987. Ammonia volatilization from point placed urea in upland, sandy soil. Fertilizer Research 12 (3) : 263-268.
- CRETENET M., DUREAU D., TRAORE B., BALLO D., 1994. Fertilité et fertilisation dans la région sud du Mali : du diagnostic au pronostic. Agriculture et développement 3 : 4-12.
- DOMMERGUES Y., MANGENOT F., 1970. Ecologie microbienne du sol. Paris, Masson, 796 p.
- DUCHAUFOR P., 1970. Précis de pédologie. 3^e édition. Paris, Masson, 481 p.
- EDWARDS D.G., BELL L.C., 1989. Acid Soils Infertility in Australian Tropical soils. In Craswell E.T., Pushparajah E. (Eds) : Management of Acid Soils in the Humid Tropics of Asia. Aciar Monograph n° 13, p. 20-31.
- ESWARAN H., BEINROTH F.H., KIMBLE J., COOK T., 1992. Soils diversity in the Tropics : Implications for Agricultural Development. In LAL R., SANCHEZ P.A. (Eds) : Myths and science of Soils of the Tropics. Sssa Spec Pub 29 : 1-16.
- FALLAVIER P., BABRE D., 1990. Statut de l'aluminium dans deux sols tropicaux acides à minéralogie différenciée. In BERTRAND R., SAINT MACARY H. (Eds) : Agronomie et ressources naturelles en région tropicales. Actes des journées de la Drn Montpellier, 1989/9/12-15. Irat, p. 247-254.
- GROS A., 1979. Engrais. Guide pratique de la fertilisation. 7^e édition. La maison rustique. Paris, 382 p.
- KRETZSCHMAR R.M., HAFNER H., BATIONO A., MARSCHNER H., 1991. Long and short-term effects of crop residues on aluminium toxicity, phosphorus availability and growth of pearl millet in an acid sandy soil. Plant and Soil 136 : 215-223.
- LANDAIS E., LHOSTE P., GUERIN H., 1991. Systèmes d'élevage et transferts de fertilité. In Pieri C. (Ed.) : Savanes d'Afrique, terres fertiles ? Montpellier, France. Cirad, p. 219-270.
- LAUDELOUT H., 1992. Le chaulage du sol forestier. Cahiers Agricultures 1 (4) : 264-269.
- MELGAR R.J., SHYTH T.J., SANCHEZ P.A., CRAVO M.S., 1992. Fertilizer: nitrogen movement in a Central Amazon, Oxisol and antisol. Fertilizer research 31 (2) : 241-252.
- MONNIER Y., 1990. La poussière et la cendre. Paysages, dynamique des formations végétales et stratégies des sociétés en Afrique de l'Ouest. 2^e édition. Paris, ministère de la coopération, 265 p.
- NYE P.H., GREENLAND D.J., 1960. The soil under shifting cultivation. Tech Comm 51, Commonwealth Bur Soils Harpenden, Bucks, UK, 156 p.
- PICHOT J., SEDOGO M.P., POULAIN J.F., ARRIVETS J., 1981. Evolution de la fertilité d'un sol ferrugineux tropical sous l'influence de fumures minérales et organiques. L'Agronomie Tropicale 36 (2) : 122-133.
- PIERI C., 1987. Bilans minéraux des sols cultivés en zone de savane humide de Madagascar et d'Afrique de l'Ouest. In Intensification de l'agriculture pluviale : relations entre la plante, le sol et l'eau. Mémoires et Travaux de l'Irat n° 13, p. 1-31.
- PIERI C., 1989. Fertilité des terres de savanes. Bilan de trente ans de recherches et de développement agricoles au sud du Sahara. Paris. Ministère de la coopération et Cirad-Irat, 444 p.

- POULAIN J.F., 1976. Amélioration de la fertilité des sols agricoles du Mali. Bilan de treize années de travaux (1962-1974). *L'Agronomie Tropicale* 31 (4) : 402-416.
- RECOUS S., 1987. Les mécanismes de la transformation de l'azote dans le sol. Perspectives agricoles, numéro spécial : fertilisation azotée et soufrée, 115 : 100-105.
- SANCHEZ P.A., BENITES, 1988. Low-input cropping for acid soils of the humid tropics: a transition technology between shifting and continuous cultivation. *In* Ibsram : Land development and management of acid soils in Africa II. Ibsram Proceedings 7 : 85-106.
- SANCHEZ P.A., LOGAN T.J., 1992. Myths and Science about the Chemistry and Fertility of Soils in the Tropics. *In*, LAL R., SANCHEZ P.A. (Eds) : Myths and science of Soils of the Tropics. Sssa Spec Pub 29 : 35-46.
- SANCHEZ P.A., SALINAS J.G., 1981. Low-input technology for managing Oxisols and Ultisols in Tropical America. *Adv Agron* 34 : 279-406.
- SCHMIDT D.R., CASLER M.D., SAEFUDDIN A., 1990. Crop response to lime and phosphorus on new bench terraces in the tropics. *Agron J.* 82 (2) : 333-337.
- SEMENT G., 1983. La fertilité des systèmes à base de cotonnier en Côte d'Ivoire. Suppl. à *Coton Fibres Trop.* Série Documents études et synthèses n° 4, 40 p.
- SOUBIES L., GADET R., LENAIN, 1955. Recherches sur l'évolution de l'urée dans les sols et sur son utilisation comme engrais azoté. *Annales Agronomiques* 6 : 977-1033.
- STEINER K.G., 1982. Intercropping in Tropical Smallholder Agriculture with Special reference to West Africa. GTZ. Eschborn. West Germany, 250 p.
- TISDALE S.L., NELSON W.L., BEATON J.D., 1985. Soil Fertility and Fertilizers. 4th Edition. McMillan, New York, Etats-Unis, 754 p.
- UEXKULL Von H.R., BOSSHART R.P., 1989a. Emploi rationnel des engrais sur les sols acides en zones tropicales humides. *Bulletin Fao Engrais et Nutrition Végétale* n°10. Rome, FAO, 56 p.
- UEXKULL Von H.R., BOSSHART R.P., 1989b. Management of Acid Upland Soils in Asia. *In* CRASWELL E.T., PUSHPARAJAH E. (Eds): Management of Acid Soils in the Humid Tropics of Asia. *Acia Monograph* n° 13.
- URIBE E.B., 1989. Phosphorus and potassium in acid soils. *In* Acid Tropical Soil Management and Land Development Practices. Ibsram Technical Notes n° 2, p. 79-104.